

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ ШЛИФОВАННОЙ АСФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ

© 2014 г. М. А. Абдулкадыров, канд. техн. наук; В. Е. Патрикеев; А. П. Семенов, канд. техн. наук

Лыткаринский завод оптического стекла, г. Лыткарино, Московская обл.

E-mail: lastro@lzos.ru

Описаны метод определения абсолютного профиля шлифованной асферической поверхности крупногабаритных астрономических зеркал с использованием линейного трёхточечного сферометра, последовательного перемещаемого перпендикулярно направлению от центра до края детали, а также способ определения вершинного радиуса. Приведены примеры успешного их использования.

Ключевые слова: телескопы, астрономические зеркала, контроль асферической шлифованной поверхности зеркала, линейный сферометр.

Коды OCIS: 220.0220; 220.0230; 220.4610; 350.1260

Поступила в редакцию 25.09.2014

Введение

При шлифовании рабочей поверхности и асферизации шлифованием крупногабаритных астрономических зеркал используются как классические методы обработки, так и асферизация малым инструментом на станках с компьютерным управлением. Для создания управляющей программы обработки необходима информация о форме поверхности, т.е. её топографическая карта. Её можно получить с помощью измерительной машины, позволяющей непосредственно определять форму рабочей поверхности в трёхмерном измерении, сравнивать эту форму с требуемой и находить отклонения, т.е. строить карту отклонений от требуемой формы. Например, для определения формы поверхности деталей диаметром до 1400 мм в ОАО ЛЗОС используется 6-координатная измерительная машина КИМ-1400 российского производства (Саратов), дающая точность отклонений от требуемой асферической поверхности в 2–3 мкм. Она построена по принципу гексапода с измерительной головкой [1]. Использование такой машины для измерений и построения карты поверхности весьма эффективно при шлифовании и особенно асферизации внеосевых оптических деталей, что позволяет получать отклонения от требуемой формы поверхности менее 5–8 мкм.

Известны способы определения отклонений от сферической формы оптической поверхности с использованием механических приборов [2–4]. В профилометре (*the swing arm profilometer*) измерительную головку, закреплённую на поворотной наклонной штанге, последовательно перемещают механически по большим дугам по контролируемой поверхности и с помощью самописца снимают показания индикатора измерительной головки (рис. 1). Профи-

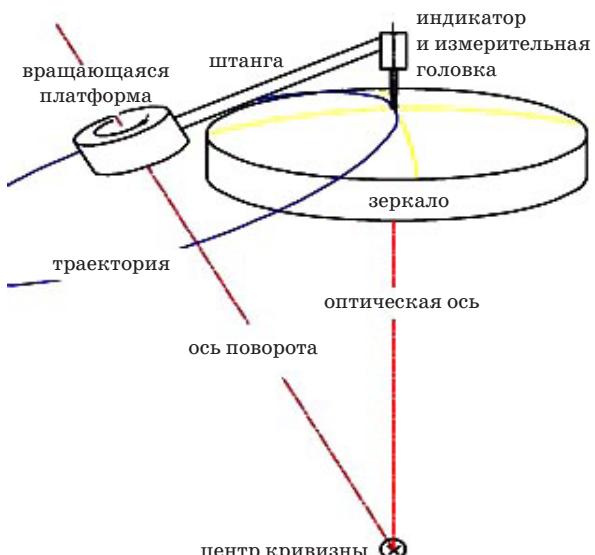


Рис. 1. Профилометр для измерения профиля асферической поверхности.

лометр с поворачивающейся “рукой” измеряет отклонения вдоль дуги по поверхности детали с центром окружности, расположенным на оси, проходящей через центр кривизны ближайшей сферы контролируемой поверхности. Измерения выполняются по нормали к поверхности, и, тем самым, определяются отклонения асферической поверхности от сферы по дугам, проходящим через вершину асферической поверхности. Однако из соображений жёсткости штанги и необходимой точности измерений способ применим для контроля зеркал относительно небольшого диаметра (не более 1 м).

Для определения формы оптической поверхности деталей любых размеров, выпуклых и вогнутых, но осесимметричных, применим метод трёхточечного линейного сферометра [1]. В его основе использовано свойство асферических поверхностей – изменение радиуса в различных зонах поверхности. При установке линейного сферометра на асферическую поверхность между краевыми и центральной ножками измеряется стрелка прогиба, которая изменяется при перемещении сферометра.

Для деталей произвольной формы на стадии шлифования может быть использован инфракрасный (ИК) интерферометр в сочетании с зеркальным корректором волнового фронта [1]. Зеркальный корректор ИК диапазона (длина волны 10,6 мкм), например, использовался для автоматизированной асферизации главных зеркал проектов VST (*VLT Survey Telescope*) [5] и VISTA (*Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy*) [6, 7].

Также для измерения отклонений поверхностей деталей любой формы диаметром до 500 мм разработан специальный прибор бесконтактного измерения NANOMEFOS (*Nanometer Accuracy Non-contact Measurement of Free-form Optical Surfaces*) [8].

Процесс обработки оптических деталей является эффективным, когда используются оптимальные из перечисленных методов в каждом конкретном случае.

Задача поиска эффективного способа получения профиля высокоасферической поверхности, когда ИК интерферометр ещё не представляется возможным использовать, а требуется получить как можно более подробную информацию о профиле для использования в программно-управляемой обработке, привела к необходимости модифицировать способ из-

мерения сферометром профиля крупногабаритных оптических деталей диаметром как до 1 м, так деталей диаметром до 6 м.

Теория метода

Для измерения профиля высокоточных асферических поверхностей крупногабаритных оптических деталей, в частности, зеркал телескопов, используется линейный трёхточечный сферометр с двумя агатовыми ножками на концах и индикаторной головкой (цена деления 0,1 мкм), установленной посередине, база сферометра равна “ a ” – расстоянию между двумя крайними агатовыми ножками сферометра. С помощью такого сферометра измеряют стрелки прогиба вдоль диаметрального направления или по хорде, касательной к центральному отверстию на детали (для деталей с центральным отверстием). Сферометр последовательно смещается на расстояние $a/2$ таким образом, чтобы одна крайняя ножка сферометра перемещалась в положение центральной ножки, центральная в положение второй крайней ножки, а вторая крайняя ножка – в новое положение. Таким образом проходитесь весь диаметральный отрезок или хорда с шагом в половину базы сферометра. При этом радиус детали (диаметр, хорда) разбивается на отдельные промежутки “ a ”, укладывающиеся на полном радиусе детали. Результаты сравниваются с расчётными значениями стрелок прогиба при каждом положении сферометра и по данным измерений строится относительный профиль отклонений от ближайшей асферической поверхности для выполнения последующего шлифования.

Дискретность построенного профиля составляет половину базы сферометра, уменьшение его базы приводит к увеличению погрешности определения профиля. Для более точного построения профиля поверхности можно использовать сферометр с двумя, тремя и более индикаторными головками [9] (рис. 2). Точность

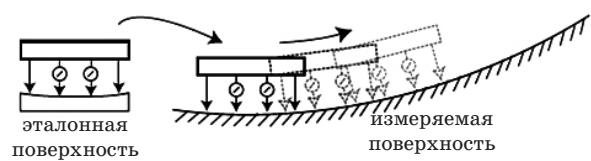


Рис. 2. Сферометр для контроля профиля асферической поверхности.

измерений сферометра может достигать 0,2 мкм при базе сферометра до 1 м с определением профиля в 5–10 мкм (среднеквадратическое отклонение) и измерением радиуса кривизны крупногабаритного зеркала с точностью 10 мм при радиусе 30 м.

Практическое использование данного метода в реальных измерениях показало, что с увеличением базы сферометра существенно возрастают его собственные деформации вследствие изменения его наклона к горизонтальному положению при перемещении вдоль диаметрального направления, что приводит к существенным погрешностям в измерениях и, соответственно, к существенным ошибкам в построении профиля.

В предлагаемом способе определения профиля шлифованной асферической поверхности также используется линейный трёхточечный сферометр с базой “*a*” и индикатором посередине. Сферометр помещается в заранее рассчитанные точки. Обычно для устойчивости сферометра на вогнутой или выпуклой поверхности его снабжают хотя бы одной вспомогательной боковой регулируемой ножкой-упором. Эта боковая ножка позволяет регулировать наклон сферометра и устанавливать его по нормали к контролируемой поверхности. Сферометр обнуляется на эталонной поверхности с известным радиусом кривизны, близким к интервалу радиусов асферической поверхности. Затем крайними ножками его устанавливают перпендикулярно диаметральному сечению в краевую зону детали с радиусом R_i (рис. 3) и перемещают крайними ножками в зону с радиусом

$$R_{i+1} = \sqrt{R_i^2 - (a/2)^2},$$

в которой до этого располагалась центральная ножка с индикатором. Затем на основании геометрических соотношений строится абсолютный профиль отклонений формы поверхности от заданного (теоретического) профиля с требуемым вершинным радиусом и эксцентриситетом и необходимым допуском на них.

При таком методе измерений существенно увеличивается количество измеренных точек, т.е. мы получаем более подробную информацию о профиле поверхности, чем при продольных измерениях, что важно для анализа профиля поверхности и выполнения асферизации.

Сферометр с базой “*a*” ($A_1 - B_1$ на рис. 3), расстоянием “*b*” от центральной до 4-й боковой ножки, обеспечивающей нормальное к поверхности положение сферометра, (рис. 4)

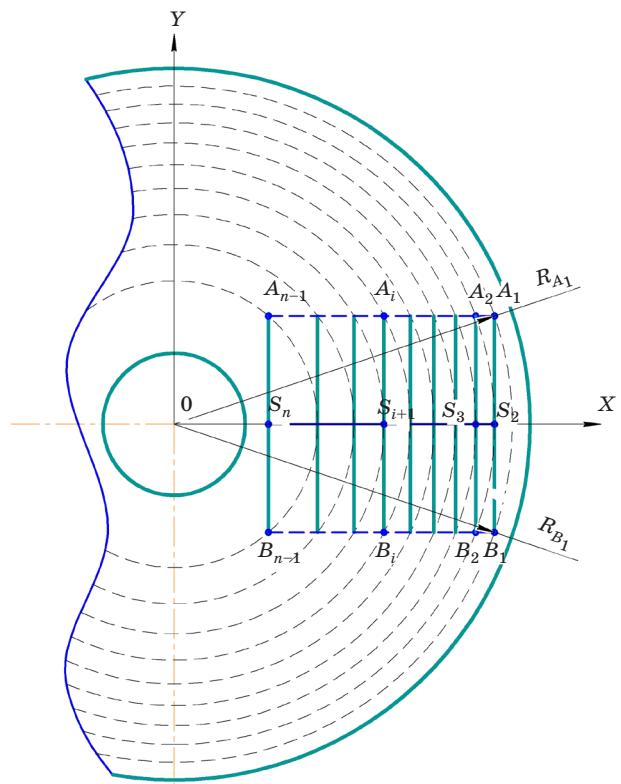


Рис. 3. Схема установки ножек сферометра на поверхности и схема для расчёта установочных точек.

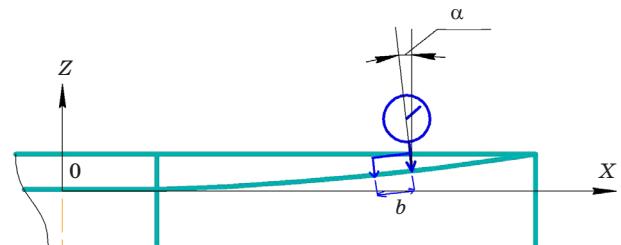


Рис. 4. Схема расположения индикатора.

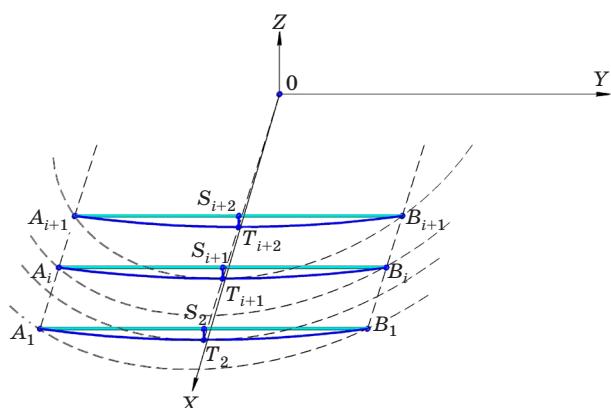


Рис. 5. Схема опорных точек и отрезков.

помещается на эталонную поверхность, обнуляется, устанавливается крайними ножками на контролируемую деталь перпендикулярно диаметральному сечению и по нормали к поверхности (рис. 4) в первую краевую зону детали (в точке A_1, B_1 рис. 3, 5) с радиусом R_{A_1} в плоскости XY , в которой отклонение профиля принимается равным $P_1 = 0$. Показания сферометра снимаются ($\Delta s_{1, \text{real}}$) относительно эталонной поверхности в точке T_2 в зоне с расстоянием от центра $R_{a_2} = \sqrt{R_{A_1}^2 - (a/2)^2}$, в которой теоретическое значение должно быть $\Delta s_{2, \text{id}}$. Определяется добавка к профилю $\Delta p_2 = \Delta s_{2, \text{real}} - \Delta s_{2, \text{id}}$ и отклонение профиля в точке $P_2 = P_1 + \Delta p_2$. Далее сферометр перемещают крайними ножками в зону, в которой располагалась центральная ножка. Снова выполняются измерения стрелки прогиба и определяются отклонения профиля в точке $P_{i+1} = P_i + \Delta p_i$. Процесс измерений продолжают до центра детали или до центрального отверстия $P_n = P_{n-1} + \Delta p_{n-1}$. Затем строится абсолютный профиль с учётом отклонений от формы поверхности с требуемыми вершинным радиусом и эксцентриситетом.

$\Delta s_{i, \text{id}}$ определяется из уравнения асферической поверхности, которое в общем виде записывается следующим образом:

$$z = \frac{cS^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)c^2 S^2}} + A_1 S^4 + A_2 S^6 + A_3 S^8 + A_4 S^{10},$$

где $S^2 = x^2 + y^2$, $c = 1/R_0$ – величина, обратная вершинному радиусу, $K = -e^2$, а e – эксцентриситет поверхности, A_1, A_2, A_3, A_4 – коэффициенты асферики поверхностей более высокого порядка (выше 2-го).

Определим значения $z_{A_1}, z_{A_2}, z_{T_2}$ и стрелку прогиба за вычетом стрелки прогиба эталонной поверхности arrow_{sh}

$$\Delta s_{i, \text{id}} = (z_{A_1} - z_{T_2} - \text{arrow}_{\text{sh}}) \cos \alpha,$$

где угол α – угол между вертикалью и нормалью к поверхности в измеряемой точке.

Практические результаты

Реализация метода представлена на примере асферизации шлифованием и измерений сферометром главного зеркала диаметром 3700 мм *Devasthal Optical Telescope (DOT) for Aryabhatta Research Institute of Observational Sciences*

(ARIES) [10] со световым измеряемым диаметром 3670 мм, вершинным радиусом кривизны асферической поверхности 14639,0 мм, конической константой $K = 1,03296$, диаметром отверстия 720 мм. Для измерений использовался линейный трёхточечный сферометр с индикаторной головкой посередине и ценой деления 0,1 мкм, базой $a = 622$ мм и боковой регулируемой по высоте вспомогательной ножкой, закреплённой сбоку индикатора на расстоянии 62 мм. Для обнуления индикатора было изготовлено контрольное эталонное зеркало радиусом 14727,0 мм с учётом, что радиус ближайшей к асферике сферы 14700,2 мм. Асферичность профиля составляет 106 мкм.

Как уже отмечалось, при измерении сферометром вдоль диаметрального направления или вдоль хорды с увеличением базы сферометра существенно возрастают его собственные деформации вследствие изменения его наклона к горизонтальному положению, что приводит к существенным погрешностям в измерениях и, следовательно, к существенным ошибкам в построении профиля. В этом методе трудно учесть такие погрешности наклона в двух плоскостях. В описываемом методе при измерениях сферометр устанавливается перпендикулярно радиальному направлению и имеет наклон только в одной плоскости. Изменения показаний сферометра в зависимости от деформаций при наклоне определялись экспериментально, и в расчёте вводилась поправка. Например, в описываемом случае поправка при наклоне сферометра к вертикальному положению на 10° составляет 5 мкм.

В таблице и на рис. 6 приведены результаты расчета профиля по описанной методике.

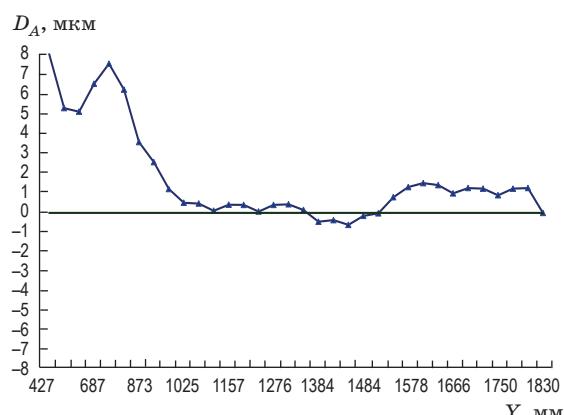


Рис. 6. Результаты расчёта профиля асферической поверхности.

Результаты расчета профиля зеркала диаметром 3670 мм

№ точки	1	2	3	4	5	...	33	34
Y_3 , мм	–	1742,23	1715,60	1688,55	1661,07	...	466,37	365,22
Z_3 , мм	–	103,66	100,52	97,37	94,23	...	7,43	4,56
S_{id} , мкм	–	6,24	5,49	4,75	4,01	...	-17,14	-17,91
S_{real} , мкм	–	4,00	2,00	1,00	1,00	...	-18,00	-16,00
Y , мм	1830,0	1803,78	1777,16	1750,13	1722,66	...	528,33	427,20
Z_{id} , мм	114,3681	111,1147	107,8599	104,6037	101,3460	...	9,533	6,233
Z_{real} , мм	114,3681	111,1160	107,8612	104,6046	101,3472	...	9,539	6,241
A_{id} , мкм	-106,17	-93,97	-82,52	-71,80	-61,83	...	-87,36	-99,30
A_{real} , мкм	-106,17	-92,70	-81,28	-70,90	-60,59	...	-82,00	-91,20
D_A , мкм	0,00	1,27	1,24	0,90	1,24	...	5,35	8,11
α , град	–	7,02	6,92	6,81	6,71	...	2,08	1,69
δ_α	–	3,51	3,46	3,41	3,35	...	1,04	0,84

Примечание. Y_3 , Z_3 – координаты третьей, вспомогательной, ножки на поверхности детали (начало координат в точке вершины детали, координата Y перпендикулярна оптической оси Z). S_{id} и S_{real} – теоретические и фактически измеренные отклонения стрелки прогиба от эталонной сферической поверхности, Y – расстояние от центра детали, Z_{id} и Z_{real} – теоретическое и фактическое значения координаты Z . A_{id} и A_{real} – теоретическое и полученное фактическое значения асферичности относительно ближайшей сферы. D_A – искомые нормальные отклонения асферической поверхности от теоретической. δ_α – поправка в показаниях сферометра.

В последней строке таблицы δ_α – поправка в показаниях сферометра, учитывающая деформации сферометра при наклонном его положении относительно рабочей поверхности. Данная поправка определяется экспериментально при различных углах наклона сферометра α (рис. 4) относительно вертикального положения. Учёт данной деформационной поправки значительно повышает точность измерений.

Для снижения погрешности измерений последние выполняются относительно эталонной сферической поверхности с известным радиусом кривизны, они повторяются несколько раз в каждом положении и усредняются. Измерения выполняются в нескольких диаметральных сечениях на поверхности детали, используется набор сферометров с разной базой, во всех измерениях учитывается поправка на деформации сферометра при наклонном расположении на поверхности измеряемой детали. Без учёта данной погрешности ошибка в описываемом случае может достигать 50 мкм (!)

Суммарная погрешность определения профиля выражается суммой погрешностей каждого измерения. Если каждое измерение выполнено с точностью 1 мкм, то в рассматриваемом случае (18 стоянок) суммарная максимальная и наи-

менее вероятная погрешность будет составлять 18 мкм, если погрешность измерений 0,2 мкм, то суммарная погрешность определения профиля менее 4 мкм.

На рис. 6 приведён усреднённый профиль, отклонения составляют около 6 мкм. Отклонения фактические включают астигматизм, асимметрию и другие остаточные ошибки. Поэтому после предварительной полировки поверхности был выполнен интерферометрический контроль с CGH-корректором и получены подтверждающие результаты.

Фактические измерения вершинного радиуса поверхности показали значение $R_0 = 14639 \pm 5$ мм (требуемое значение ± 7 мм), что составляет отклонение от заданного значения 0,03%. Ошибка формы поверхности составила 16 мкм. Интерферограмма волнового фронта после предварительной полировки поверхности зеркала представлена на рис. 7.

Следует особо отметить, что после сферометрических измерений и предварительной полировки контроль осуществлен и ИК интерферометром с корректором и CGH-корректором в видимом диапазоне [11], поэтому ИК корректор, фактически, не понадобился. Таким же образом выполнялась асферизация зеркала



Рис. 7. Интерферограмма волнового фронта после предварительной полировки поверхности зеркала.

проекта TNT (*Thai National telescope, Australia – Thailand*) диаметром 2400 мм с асферичностью 160 мкм, а также ряд других крупных проектов изготовления главных и вторичных зеркал.

Результаты, приведённые на рис. 6 и 7, показывают высокую эффективность и надёж-

ность предложенного метода измерения профиля шлифованной асферической поверхности и практически подтверждают достижение технического результата: построение абсолютного профиля отклонений формы асферической поверхности оптической детали от требуемой теоретической с необходимой точностью (отклонение вершинного радиуса от заданного менее 0,03–0,05%) и достижение заданного значения вершинного радиуса в процессе формообразования.

Заключение

В предложенном методе измерения профиля асферической поверхности при перпендикулярном его расположении диаметральному сечению и последовательном перемещении его от центра к краю удается получить подробный профиль абсолютных отклонений асферической поверхности от требуемой с точностью в 5–10 мкм и требуемый вершинный радиус с точностью менее 0,03–0,05% от заданного. Успешная реализация метода была продемонстрирована при асферизации зеркал по проектам VST, TNT, VISTA, DOT ARIES и др.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Patrikeev V.E., Pridnya V.V. Methods of fabrication and testing of unique large size optics in LZOS, JSC (VST, VISTA and other projects) // Proc. SPIE. 2012. V. 8450. P. 84504T.
2. Burge J.H. Measurement of large convex aspheres // Proc. SPIE. 1996. V. 2871. P. 362–373.
3. Smith B.K., Burge J.H., Martin H.M. Fabrication of large secondary mirrors for astronomical telescopes // Proc. SPIE. 1997. V. 3134. P. 51–61.
4. Burge J.H., Su P., Zhao C. Optical metrology for very large convex aspheres // Proc. SPIE. 2008. V. 7018. P. 701818-1–701818-12.
5. Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Pridnya V.V., Polyanchikov A.V., Rumyantsev V.V., Samuylov A.V., Semenov A.P., Sharov Y.A. Manufacturing of primary mirrors from Sitall CO-115M for European projects TTL, NOA and VST // Proc. SPIE. 2001. V. 4451. P. 131–137.
6. Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Patrikeev A.P., Patrikeev V.E., Pridnya V.V. M1 and M2 mirror manufacturing for ARIES project: Current status // Proc. SPIE. 2010. V. 7739. P. 773907.
7. Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Pridnya V.V., Polyanchikov A.V., Rumyantsev V.V., Samuylov A.V., Sharov Y.A. Manufacturing of secondary mirrors from Sitall CO-115M for European projects TTL, NOA and VST // Proc. SPIE. 2001. V. 4451. P. 138–144.
8. Henselmans R., Rosielie P.C.J.N., Steinbuch M., Saunders I.J. Nanometer accuracy noncontact measurement of freeform optical surfaces // Philips Precision Technology Conference, 2005. P. 117– 21.
9. Bely P.Y. The design and construction of large optical telescopes. Springer, 2002. 167 p.
10. Semenov A.P. Accomplished the task of production of the primary and secondary mirrors of Devasthal Optical Telescope under the project ARIES (India, Belgium, Russia): Fabrication features // Proc. SPIE. 2012. V. 8450. P. 84504R.
11. Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Patrikeev V.E., Semenov A.P. Interference testing methods of large astronomical mirrors base on lenses and CGH wavefront correctors // Proc. SPIE. 2010. V. 7739. P. 77390P.